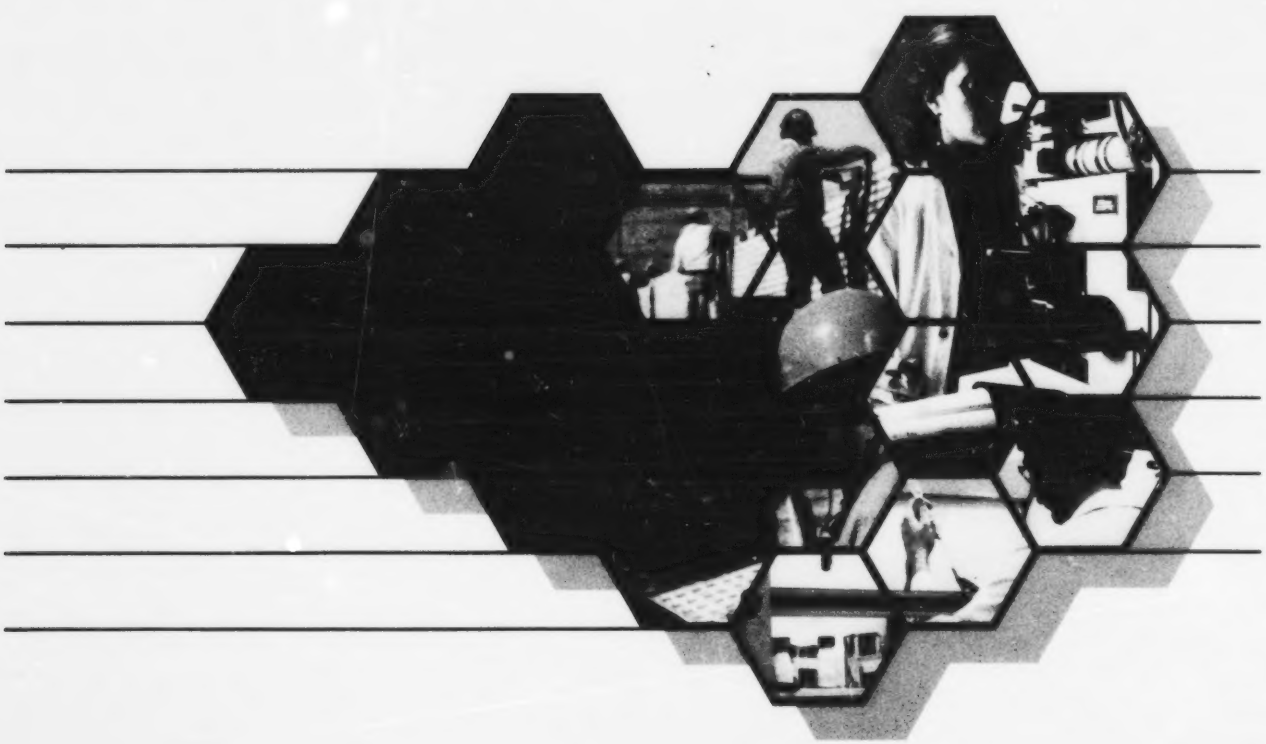
IRSST
Institut de recherche
en santé et en sécurité
du travail du Québec

Évaluation de l'exposition aux vibrations globales du corps à l'aide d'une méthode «quadri-puissance» et comparaison avec ISO 2631

par Paul-Émile Boileau, Denis Turcot et Henri Scory
Direction des laboratoires
IRSST

Juin 1988

Rapport de recherche



P.-É. Boileau, D. Turcot et H. Scory

Évaluation de l'exposition aux vibrations globales du corps à l'aide d'une méthode «quadri-puissance» et comparaison avec ISO 2631

Problème visé:
Sous-estimation des effets des vibrations globales du corps par la norme ISO 2631 lorsqu'il s'agit de vibrations de type impulsionnel telles que retrouvées sur les débusqueuses.

Retombées attendues:
En quantifiant le degré de sous-estimation causée pour un cas concret de vibrations mesurées sur des débusqueuses, générer des données de base qui justifieraient l'insertion d'une nouvelle méthode d'analyse «quadri-puissance» dans la norme ISO 2631 pour traiter adéquatement de cas complexes de vibrations de type impulsionnel.

Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec
505, boulevard de Maisonneuve Ouest,
Montréal (Québec) H3A 3C2
(514) 288-1551
Télécopieur: 288-0998
IRSST MTL

Cette étude a été financée par l'IRSST.
Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

© Tous droits réservés IRSST
Dépôt légal
Bibliothèque nationale du Québec
ISBN 2-550-18583-8
ISSN 0820-8395

I R S S T

1.0 INTRODUCTION

Les vibrations globales du corps enregistrées sur des véhicules forestiers (les débusqueuses par exemple) comprennent des niveaux crêtes d'accélération d'intensité variable, dépendant du type d'interaction pneus-terrain survenant durant l'opération des véhicules. Des mesures effectuées sur des débusqueuses[1,2] ont montré qu'en utilisant les pondérations en fréquences de la norme ISO 2631[3], le facteur de crête f_c (rapport de la valeur crête d'accélération pondérée sur la valeur efficace d'accélération pondérée) peut varier typiquement entre 5 et 12.5 pour les vibrations verticales (z) et entre 4 et 7 pour les vibrations transversales (x,y).

D'après les spécifications de la norme ISO 263l/1, la méthode de la valeur efficace qui y est proposée comme méthode d'analyse devrait s'appliquer uniquement aux vibrations pour lesquelles le facteur de crête est inférieur à 6 afin de prévenir une sous-estimation des effets des vibrations. Toutefois, étant donné qu'aucune méthode alternative n'est proposée dans la norme, l'analyse est généralement effectuée en utilisant la méthode de la valeur efficace même lorsque le facteur de crête est plus élevé.

Dans cette étude, nous tentons d'évaluer la sous-estimation des effets des vibrations sur le confort et la santé résultant de l'application de la méthode d'analyse d'ISO 2631 aux vibrations dont le facteur de crête est supérieur à 6. Pour ce faire, la méthode d'évaluation ISO 2631 est appliquée à des vibrations enregistrées sur des débusqueuses et comparée à une méthode "quadri-puissance" dont l'applicabilité n'est pas limitée aux mouvements à facteur de crête faible.

Toutes les références bibliographiques sont inscrites à la fin du texte.

La méthode "quadri-puissance" est présentement considérée au niveau international de normalisation pour faire partie de l'ébauche d'une nouvelle proposition pour ISO 2631/1. Au Royaume-Uni, la norme [4] utilisée pour mesurer et évaluer l'exposition aux vibrations globales du corps utilise la méthode quadri-puissance lorsque le facteur de crête est supérieur à 6. Cette méthode est basée sur une relation dépendant du temps de la forme a^4t = constante ("a" étant le niveau de l'accélération et "t " le temps d'exposition) qui semble en accord avec les résultats expérimentaux obtenus par Griffin [5,6] dans ses travaux traitant de la réaction humaine aux vibrations .

La méthode d'évaluation ISO 2631 et la méthode proposée dans la norme britannique diffèrent à plusieurs égards, plus particulièrement en ce qui concerne les trois aspects suivants: les pondérations en fréquences, les paramètres utilisés pour quantifier l'exposition aux vibrations et les relations dépendant du temps.

Ces différences sont illustrées en traitant le cas des vibrations enregistrées à l'interface conducteur-siège sur des débusqueuses.

2.0 COMPARAISON DE LA MÉTHODE "QUADRI-PUISSANCE" PROPOSÉE AVEC ISO 2631

2.1 Courbes des pondérations en fréquences

La norme britannique [4] introduit, avec la méthode "quadri-puissance", des courbes de pondérations en fréquences différentes de celles apparaissant dans ISO 2631. Différentes courbes sont définies pour les trois axes de vibrations, x, y et z, exprimant la façon dont les vibrations influencent la santé, les activités humaines, le confort, la perception et le mal des transports.

La figure 1 illustre les différences fondamentales entre les courbes d'ISO 2631 et ces "nouvelles" courbes de pondérations en fréquences en ce qui concerne l'évaluation du confort et des effets sur la santé. Les nouvelles courbes proposées, W_b et W_d , sont définies dans le domaine de fréquences de 0.5-80 Hz comparativement à 1.0-80 Hz pour les pondérations W_z et $W_{x,y}$. Les pondérations W_d et $W_{x,y}$ sont très semblables mais la pondération W_b diffère de la pondération W_z en ce qu'elle tend à mettre moins l'accent sur les vibrations à basses fréquences et à accorder une importance supérieure aux composantes de fréquences plus élevées.

Lors des essais expérimentaux, nous avons réalisé les pondérations W_b et W_d au moyen de filtres analogiques dont la tolérance était de moins de 1 dB dans la gamme de fréquences 1.0 à 80 Hz pour W_b et 0.5 à 80 Hz pour W_d.

Les valeurs pondérées en fréquences des accélérations efficaces (a_{rms}) ainsi que les facteurs de crête (f_c), obtenus en utilisant les pondérations W_b et W_z, apparaissent au tableau 1 pour les vibrations verticales (z), enregistrées sur huit débusqueuses. Ces valeurs sont obtenues en utilisant une période d'intégration fixe de 60 secondes. L'accélération efficace obtenue avec la pondération W_b est en moyenne 1.18 fois inférieure à la valeur obtenue avec la pondération W_z. Ceci est en accord avec le fait que la majeure partie de l'énergie vibrationnelle est concentrée dans le bas du spectre des fréquences , c'est-à-dire 1-5 Hz, et que la pondération W_b accorde moins de poids à cette région. L'application de la pondération W_b conduit à des valeurs de facteurs de crête généralement supérieures à celles obtenues en utilisant la pondération W_z. Les facteurs de crête obtenus avec la pondération W_z sont généralement supérieurs à 6 sauf pour la débusqueuse numéro 7.

2.2 Caractérisation de l'exposition aux vibrations

La méthode d'analyse "quadri-puissance" introduit deux nouveaux paramètres pour caractériser l'exposition aux vibrations: la Valeur de la Dose de Vibrations (VDV) et l'accélération quadri-puissance (a_{rmq}). Ces paramètres diffèrent de façon importante de l'accélération efficace (a_{rms}) utilisée dans la norme ISO 2631. Contrairement à la valeur efficace, les paramètres de "quadri-puissance" ont l'avantage de ne pas être limités aux mouvements à facteurs de crête faibles. Du fait de leur dépendance à la quatrième puissance sur le niveau instantané d'accélération, ils tendent à accentuer les effets des évènements de courtes durées, ou chocs, considérés nocifs pour le confort et la santé.

La VDV est utilisée pour évaluer les effets sur la santé; elle fournit une valeur de dose à l'aide d'un chiffre unique représentant l'effet cumulatif des vibrations dans le temps. Mathématiquement, elle est définie comme:

$$VDV = \left[\int_0^T a_w^4 (t)\, dt \right]^{1/4} (ms^{-1.75}) \qquad (1)$$

où

a_w (t): accélération instantanée pondérée en fréquences au temps t (ms^{-2}).

T : temps d'intégration ou d'exposition en secondes.

L'accélération quadri-puissance, utilisée pour évaluer les effets sur le confort, se définit comme suit:

$$a_{rmq} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^4 (t)\, dt \right]^{1/4} (ms^{-2}) \qquad (2)$$

Dans la norme britannique [4] une évaluation subjective de l'inconfort causé par les vibrations globales du corps est proposée, basée sur la valeur de l'accélération efficace. Le schéma de classement apparaît dans la figure 2 où il est appliqué aux valeurs d'accélération efficace des vibrations verticales enregistrées sur huit débusqueuses différentes. Pour l'un de ces véhicules (débusqueuse numéro 2) les valeurs rms des axes x et y sont aussi évaluées et combinées vectoriellement avec les vibrations de l'axe des z. Dans ce cas, la valeur rms obtenue par somme vectorielle se trouve dans la zone "très inconfortable".

2.3 Relations dépendant du temps

ISO 2631/1 prévoit une relation dépendant du temps exprimant le niveau permis de la valeur efficace d'accélération a_{rms} en fonction du temps d'exposition "t". Cette relation est basée sur les limites au confort réduit, à la capacité réduite par la fatigue et la limite d'exposition (santé) telles que définies dans la norme. Différentes courbes exprimant cette relation pour diverses fréquences de vibrations sont présentées. Celles-ci ont été établies suite au comportement observé d'individus soumis pour la plupart à des vibrations sinusoïdales pour différentes périodes de temps et différents niveaux d'accélération efficace d'exposition. Des limites ont ainsi été conçues basées sur ces résultats. Dans le cas des vibrations à bandes larges, plus complexes, la courbe correspondant à la composante fréquentielle prédominante des vibrations peut être utilisée pour l'estimation du temps d'exposition permis.

La méthode "quadri-puissance", par contre, ne tente pas de définir de limites précises, mais fournit plutôt une relation dépendant du temps basée sur l'observation du comportement apparent du corps humain assujetti aux vibrations. Les travaux de Griffin[5, 6] suggèrent que ce comportement, analysé sur de courtes périodes d'exposition, correspond à une relation de la forme a^4t = constante; des paramètres convenables basés sur la méthode "quadri-puissance" (i.e. VDV et a_{rmq}) doivent donc ainsi être définis pour caractériser l'exposition aux vibrations.

Dans le cas des vibrations verticales, dont l'accélération efficace $a_{o,i}$ est enregistrée dans la $i^{ème}$ bande de fréquences, l'expression suivante est une bonne approximation de la relation dépendant du temps apparaissant dans la norme ISO 2631:

$$w_i\, a_{o,i} = A\, t^{-0.631} \qquad (3)$$

pour $1500 \leq t \leq 57600$ s

où

w_i : facteur de pondération ISO dans le $i^{ème}$ bande de fréquence

$a_{o,i}$: valeur de l'accélération efficace non pondérée dans la $i^{ème}$ bande de fréquence (ms^{-2})

A : constante qui varie selon l'effet évalué (i.e. confort, capacité réduite par la fatigue, détérioration de la santé)

t : temps d'exposition (s)

Le côté droit de l'équation (3) représente une approximation obtenue par ajustement de courbes. Il s'agit de la relation dépendant du temps pour la bande de fréquences 4-8 Hz dans un domaine de temps d'exposition variant de 25 à 960 minutes, lorsque le facteur de pondération w_i est égal à 1.

Pour des vibrations aléatoires de type impulsionnel, telles que celles enregistrées en direction verticale sur des débusqueuses, les résultats des mesures démontrent que l'accélération prédominante apparaît dans la bande de fréquences correpondant au tiers d'octave 2.5 Hz[2]. L'accélération pondérée en fréquences pour cette composante est d'ailleurs d'amplitude approximativement égale à la moitié de la valeur de l'accélération efficace globale pondérée en fréquences dans le domaine 1-80 Hz, soit:

$$w_i\, a_{o,i}\,\Big|_{2.5\ Hz} \simeq 1/2\, a_{rms,\,Wz} \qquad (4)$$

où

$a_{rms,\,W_z}$: accélération efficace globale pondérée selon W_z dans le domaine 1-80 Hz

En appliquant la relation dépendant du temps de l'équation (3) à la composante fréquentielle prédominante des vibrations verticales des débusqueuses, des expressions dépendant du temps, correspondant aux limites de la norme ISO 2631/1 sont obtenues pour ce cas particulier afin d'évaluer le temps d'exposition permis pour des valeurs précises des niveaux d'accélération globale pondérée. Ces expressions, dépendant des effets à évaluer, ont la forme suivante:

Pour les effets reliés au confort:

$$a_{rms,\,W_z} \simeq 135.76\, t^{-0.631} \qquad (5)$$

Pour les effets reliés à la santé:

$$a_{rms,\,W_z} \simeq 855.28\, t^{-0.631} \qquad (6)$$

pour $1500 \leq t \leq 56000$s

Ces expressions représentent les équations de base pour calculer les doses d'exposition en utilisant la méthode de la valeur efficace.

3.0 RELATION ENTRE LES ACCÉLÉRATIONS QUADRI-PUISSANCE ET EFFICACE ET LE FACTEUR DE CRÊTE

3.1 Signaux sinusoïdaux

On considère une salve de signaux sinusoïdaux (figure 3) pour lequel t_i représente la durée de la salve,T représente la période d'intégration fixée à une minute et a_p représente la valeur crête d'accélération du signal.

Le facteur de crête étant défini comme le rapport de la valeur crête d'accélération à sa valeur efficace évaluée sur un intervalle de temps fixe d'une minute, sa valeur peut être modifiée en variant la durée, t_i , de la salve et le niveau crête d'accélération, a_p, du signal, en gardant le temps d'intégration, T, et la valeur efficace, a_{rms}, constantes.

Le facteur de crête est ainsi donné par l'expression:

$$f_c = \frac{a_p}{a_{rms}} = \left[\frac{2T}{t_i} \right]^{1/2} \qquad (7)$$

En utilisant la définition de l'accélération rmq donnée dans l'équation (2), l'expression suivante est obtenue pour la valeur rmq de la salve sinusoïdale:

$$a_{rmq} = \left[\frac{3}{8} \quad a_p^4 \quad \frac{t_i}{T} \right]^{1/4} \qquad (8)$$

En substituant à l'aide de l'équation (7), on obtient:

$$a_{rmq} = 0.931\, f_c^{1/2}\, a_{rms} \qquad (9)$$

Dans le cas d'un signal sinusoïdal continu, de facteur de crête $f_c = 1.414$, cette expression conduit, tel que prévu, à une valeur de 1.107 pour le rapport a_{rmq} sur a_{rms}.

Sachant que le coefficient d'aplatissement est tout simplement la quatrième puissance du rapport a_{rmq} sur a_{rms}, (ie. $K_c = (a_{rmq}/a_{rms})^4$, le résultat ci-haut conduit à un coefficient d'aplatissement de 1.5 pour le signal sinusoïdal, en accord avec la valeur théorique.

Le résultat obtenu dans l'équation (9) illustre le fait que, pour une valeur fixe de l'accélération efficace (rms), la valeur rmq augmente en fonction du facteur de crête. Ainsi, ce résultat souligne l'importance de la contribution de l'accélération instantanée crête à la détermination des paramètres "quadri-puissance".

Par contraste avec l'expression donnée dans l'équation (9), l'approximation de Griffin[4] pour les vibrations dont la valeur du facteur de crête est inférieur à 6 est:

$$a_{rmq} = 1.4\ a_{rms} \qquad (10)$$

Cette approximation a été établie en se basant sur des valeurs rms et rmq mesurées sur différents véhicules dans des conditions de route différentes[6]. Il s'agit donc d'une relation empirique, qui est indépendante du facteur de crête.

Par rapport à l'équation (9), l'approximation de Griffin sous-estime la valeur rmq par un facteur de 1.63 pour un facteur de crête de 6. Les deux expressions sont équivalentes pour une valeur du facteur de crête de 2.3.

L'analyse utilisant des salves de signaux est également appliquée à des signaux de forme triangulaires et rectangulaires. Les expressions obtenus pour a_{rmq}/a_{rms}, f_c et le coefficient d'aplatissement apparaissent dans le tableau 2. À partir de ces relations, on obtient une expression générale reliant les accélérations rmq et rms et le facteur de crête:

$$a_{rmq} = C\, f_c^{1/2}\, a_{rms} \qquad (11)$$

où

C: constante dont la valeur dépend du type de signal analysé.

Cette expression illustre la variation de l'accélération rmq en fonction des niveaux crêtes d'accélération lorsque la valeur rms est maintenue constante.

3.2 Signaux aléatoires de débusqueuses de type impulsionnel

Les accélérations rmq et rms ainsi que le facteur de crête sont évalués pour des signaux vibratoires verticaux d'une durée d'une minute enregistrés sur huit débusqueuses différentes. La figure 4 montre le montage utilisé pour cette évaluation; une intégration numérique est utilisée pour calculer les valeurs rms et rmq.

Les résultats sont présentés graphiquement dans la figure 5 ; les données expérimentales sont en bon accord (coefficient de corrélation de 0.90) avec une relation dont l'expression est:

$$a_{rmq} = 0.58\, f_c^{1/2}\, a_{rms} \qquad (12)$$

Cette relation est obtenue en utilisant le filtre de pondération W_b, conduisant à des valeurs de facteur de crête supérieures à 7.2. Les accélérations prédites à partir de l'équation ci-dessus s'approchent à 6,5% près des accélérations évaluées expérimentalement. Les

prédictions de l'approximation de Griffin ainsi que la relation attendue pour les signaux sinusoïdaux sont également portées en graphique dans la figure 5 afin d'illustrer que les données expérimentales sont en meilleur accord avec l'équation (12) ci-dessus.

Dans la mesure où les segments de vibrations enregistrés sur une période d'une minute sont représentatives des vibrations auquel un conducteur est soumis durant toute une journée de travail, l'expression ci-haut peut être utilisée pour évaluer la Valeur de la Dose Vibrationnelle journalière pour une durée d'exposition réelle, T. La VDV est ainsi donnée par:

$$VDV = 0.58\, f_c^{1/2}\, a_{rms}\, T^{1/4} \qquad (13)$$

Les équations (12) et (13) fournissent les relations nécessaires permettant d'établir une comparaison entre les prédictions de la méthode "quadri-puissance" avec celles d'ISO 2631 pour les vibrations enregistrées sur des débusqueuses.

4.0 ESTIMATION DE LA DOSE VIBRATIONNELLE EN UTILISANT LA MÉTHODE "QUADRI-PUISSANCE" ET COMPARAISON AVEC ISO 2631

Dans cette section, la dose[7] est définie comme le rapport du temps d'exposition journalier réel sur le temps requis pour atteindre les limites pour ISO 2631/1. L'opération de débusqueuses implique généralement un temps d'exposition réel journalier de cinq heures.

4.1 Évaluation des effets reliés au confort

La relation ISO dépendant du temps, donnée par l'équation (5), peut être écrite en fonction de l'accélération pondérée selon W_b en utilisant l'approximation pour les vibrations des débusqueuses donnée dans la section 2.1, c'est-à-dire:

$$a_{rms,\,W_z} \simeq 1.18\; a_{rms,\,W_b} \qquad (14)$$

Sachant que la relation ISO 2631 dépendant du temps est donnée principalement pour des signaux sinusoïdaux, une forme équivalente en fonction de l'accélération rmq peut s'écrire:

$$a_{rmq,\,W_b} = 127.36\; t^{-0.631} \qquad (15)$$

confort

$1500 \leq t \leq 57600$ s

Se basant sur cette relation, une expression théorique approximative peut être établie, donnant le rapport de la dose prédite pour les vibrations aléatoires de type impulsionnel des débusqueuses sur la dose prédite pour un signal sinusoïdal de même valeur rms. L'expression obtenue varie uniquement en fonction du facteur de crête; elle est présentée graphiquement dans la figure 6.

Les résultats indiquent que les valeurs de dose calculées à l'aide des deux approches convergent pour une valeur du facteur de crête approchant 3.6; la dose pour les vibrations des débusqueuses augmente ensuite en fonction du facteur de crête, du moins dans le domaine des valeurs de facteur de crête pour lesquelles les données sont disponibles. Pour les valeurs de facteur de crête inférieures à 3.6, il est admis que la dose calculée pour les vibrations des débusqueuses ne tomberait jamais sous la dose prédite pour les vibrations sinusoïdales. Le rapport des doses est donc fixée à 1.0 dans cette région.

Les données expérimentales sont relativement en bon accord avec la courbe théorique approximative. Ceci indique, que pour des débusqueuses, la dose relative au confort réduit, prédite en utilisant la procédure rmq, serait de un à trois fois plus élevée que celle prédite en utilisant la procédure rms, dépendamment de la valeur du facteur de crête des signaux.

4.2 Évaluation des effets reliés à la santé

La relation ISO dépendant du temps, relative aux effets sur la santé, pondérée en W_b, peut s'écrire:

$$a_{rms,\,W_b} = 724.81\; t^{-0.631} \qquad (16)$$

santé

En utilisant l'équation (13) comme relation "quadri-puissance" dépendant du temps, une expression pour le rapport de la dose prédite par la méthode "quadri-puissance" sur la dose prédite en utilisant la méthode ISO peut être obtenue pour chacune des débusqueuses ayant des valeurs VDV et a_{rms} fixes. Cette expression apparaît graphiquement à la figure 7, pour une des débusqueuses, illustrant comment la dose peut varier en fonction du facteur de crête pour une accélération et une VDV constantes. Selon cette relation, la méthode ISO pour ce cas particulier, conduit à des résultats approximatifs pour des valeurs de facteur de crête inférieures à 4.6. Pour des valeurs plus élevées, la dose est sous-estimée par un facteur variant de un à sept fois, dépendant de la valeur du facteur de crête.

Dans la figure 8, la relation ISO dépendant du temps est comparée graphiquement à la relation "quadri-puissance" pour une valeur de la VDV fixée à 25 $ms^{-1.75}$. Le graphique montre que la pente pour la relation ISO 2631 est beaucoup plus grande que pour la relation "quadri-puissance". Par rapport à la relation "quadri-puissance", la relation ISO conduit peut-être à une sur-estimation des effets des vibrations pour des périodes d'expositions plus

longues et à une sous-estimation pour des périodes plus courtes. Pour chaque valeur de facteur de crête, il existe toujours un point pour lequel les deux approches conduisent au même résultat. Le graphique met en évidence le fait que les effets des vibrations semblent augmenter avec l'augmentation du facteur de crête, même si l'accélération rms demeure constante.

5.0 CONCLUSION

Les résultats des mesures de vibrations globales du corps effectuées sur des débusqueuses sont utilisés pour obtenir une relation entre l'accélération rms, le facteur de crête et l'accélération rmq. Cette relation illustre l'importance des chocs ou des valeurs instantanées élevées du signal vibratoire dans la caractérisation de l'exposition aux vibrations. Dans cette relation, le degré d'impulsivité est caractérisé par le facteur de crête qui est défini en spécifiant la période de temps sur lequel il est évalué.

En se basant sur la relation dérivée dans ce travail et les relations dépendant du temps proposées dans la norme ISO 2631, des expressions permettant de quantifier les estimations de doses relatives au confort et à la santé pour les opérateurs de débusqueuses sont obtenues. En comparaison avec la méthode "quadri-puissance", pour laquelle le facteur de crête est important, les résultats démontrent que l'utilisation de la méthode ISO 2631 peut conduire à des estimations de doses de un à trois fois plus faibles pour le confort et de un à sept fois plus faibles pour la santé, dépendant de la valeur du facteur de crête des signaux.

Références citées:

1. BOILEAU, P.-É., SCORY, H. et Al. 1986 Compte-rendu du 12e Congrès international d'acoustique, Toronto, Canada, F2-8. «Vibration exposure of skidder operators in the Québec forestry sector».

2. BOILEAU, P.-É et SCORY, H. 1988, Archives des maladies professionnelles de médecine du travail et de sécurité sociale 49, 10 p. «Les lombalgies chez les conducteurs de débusqueuses: étude des vibrations appliquées au corps entier dans les chantiers forestiers du Québec», (sous presse).

3. Norme internationale ISO 2631/1. «Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements». 1985-05-15.

4. British Standard 6841. «Guide to the measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock». British Standard Institution, 1987.

5. GRIFFIN, M. J. 1985 Compte-rendu de la réunion: "Criteria of Evaluation of the Effects of Whole-Body Vibration on Man" Moscou. Édité par N.F. Izmerov et G.A. Suvorov, 30-41. «A single number dose procedure for whole-body vibration and repeated shock».

6. GRIFFIN, M. J.et WHITMAN, E. M. 1980,Journal of the Acoustical Society of America 68, 1277-1284. «Discomfort produced by impulsive whole-body vibration».

7. ROURE, L. et MEREAU, P. 1983 Les vibrations industrielles. Numéro spécial de Travail et Sécurité, I.N.R.S., 46-59. «Les effets des vibrations sur l'homme, les maladies professionnelles indemnisables, les valeurs limites d'exposition, la normalisation».

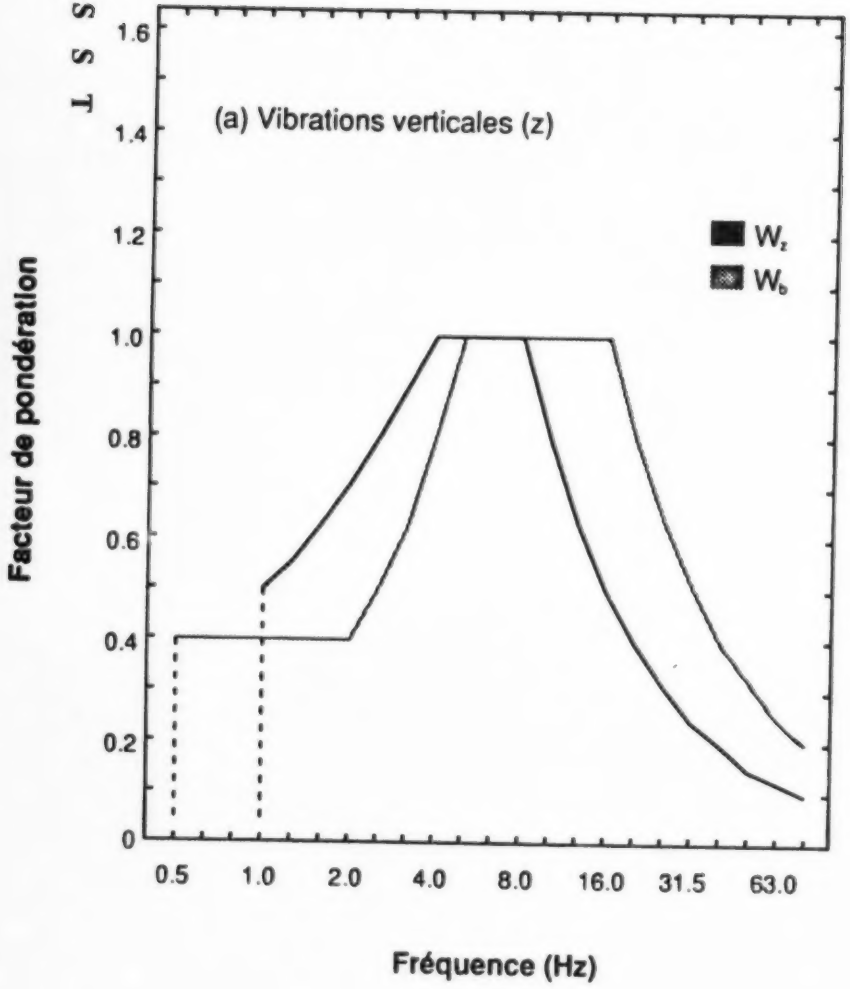
Tableau 1: Comparaison des filtres W_z et W_b à l'aide de vibrations verticales (z) enregistrées sur des débusqueuses

Débusqueuse no.	Pondération W_z		Pondération W_b	
	a_{rms} (ms^{-2})	f_c	a_{rms} (ms^{-2})	f_c
1	1.01	6.9	0.77	9.0
2	0.88	6.0	0.72	7.2
3	0.84	8.8	0.72	13.2
4	1.10	7.0	0.98	11.1
5	0.64	8.2	0.55	9.6
6	1.07	7.3	0.95	7.4
7	0.70	4.7	0.63	8.0
8	0.74	9.4	0.62	9.0

Note: a_{rms} et f_c ont été évalués en utilisant une période d'intégration de 1 minute

Tableau 2: Estimation des valeurs rms et rmq pour des signaux de formes connues

Type de signal	Continu			Salve de signaux		
	a_{rmq}/a_{rms}	f_c	K_c	a_{rmq}/a_{rms}	f_c	K_c
Sinusoïdal	1.11	1.41	1.5	$0.93\ f_c^{\frac{1}{2}}$	$\left(\frac{2T}{t_i}\right)^{\frac{1}{2}}$	$0.75\ f_c^2$
Triangulaire	1.16	1.73	1.8	$0.88\ f_c^{\frac{1}{2}}$	$\left(\frac{3T}{t_i}\right)^{\frac{1}{2}}$	$0.60\ f_c^2$
Rectangulaire	1.00	1.00	1.0	$1.00\ f_c^{\frac{1}{2}}$	$\left(\frac{T}{t_i}\right)^{\frac{1}{2}}$	$1.00\ f_c^2$



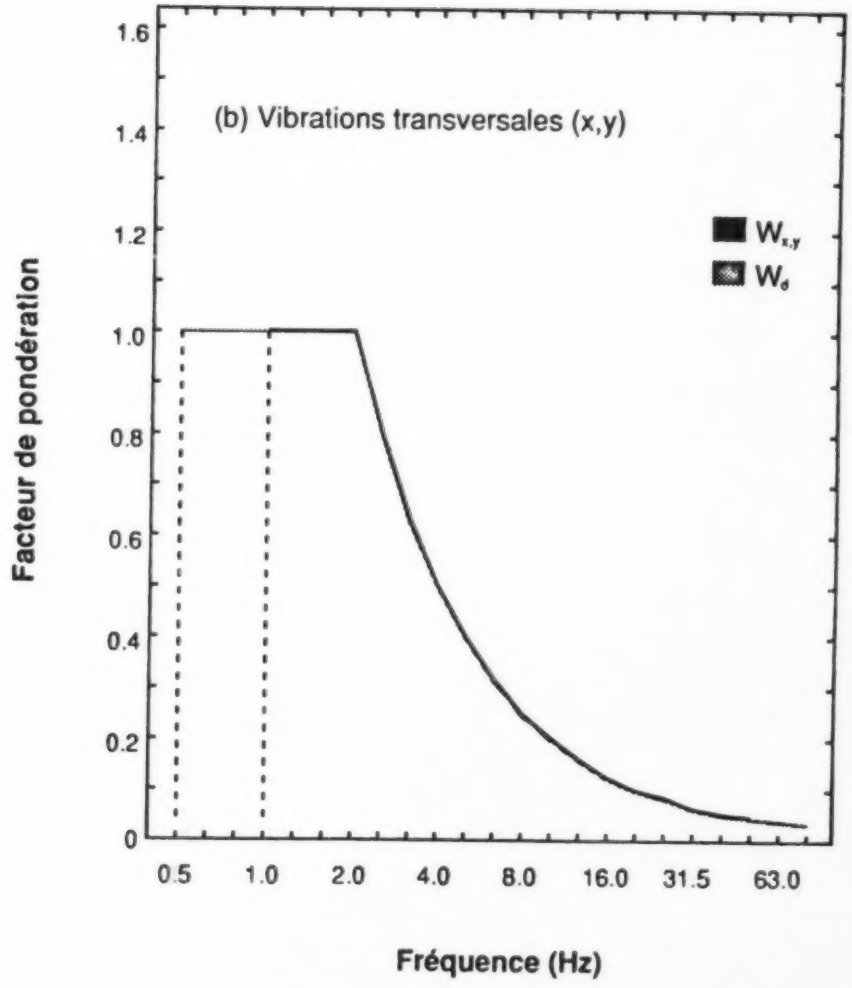


Figure 1. Courbes de pondération en fréquences pour évaluer les effets sur la santé et le confort. (a) Vibrations verticales; (b) Vibrations transversales

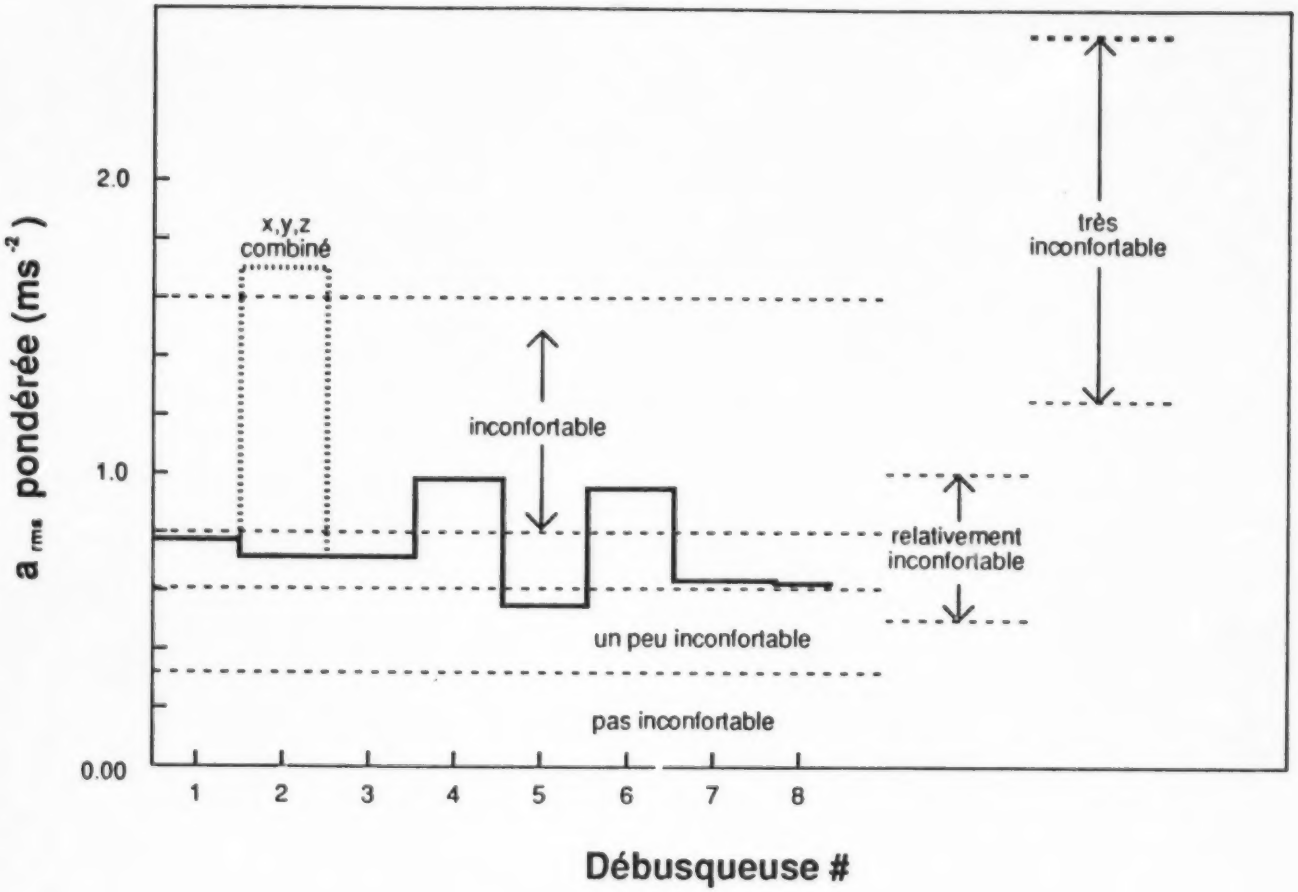


Figure 2: Réactions probables à divers niveaux d'accélération efficace (axe des z)

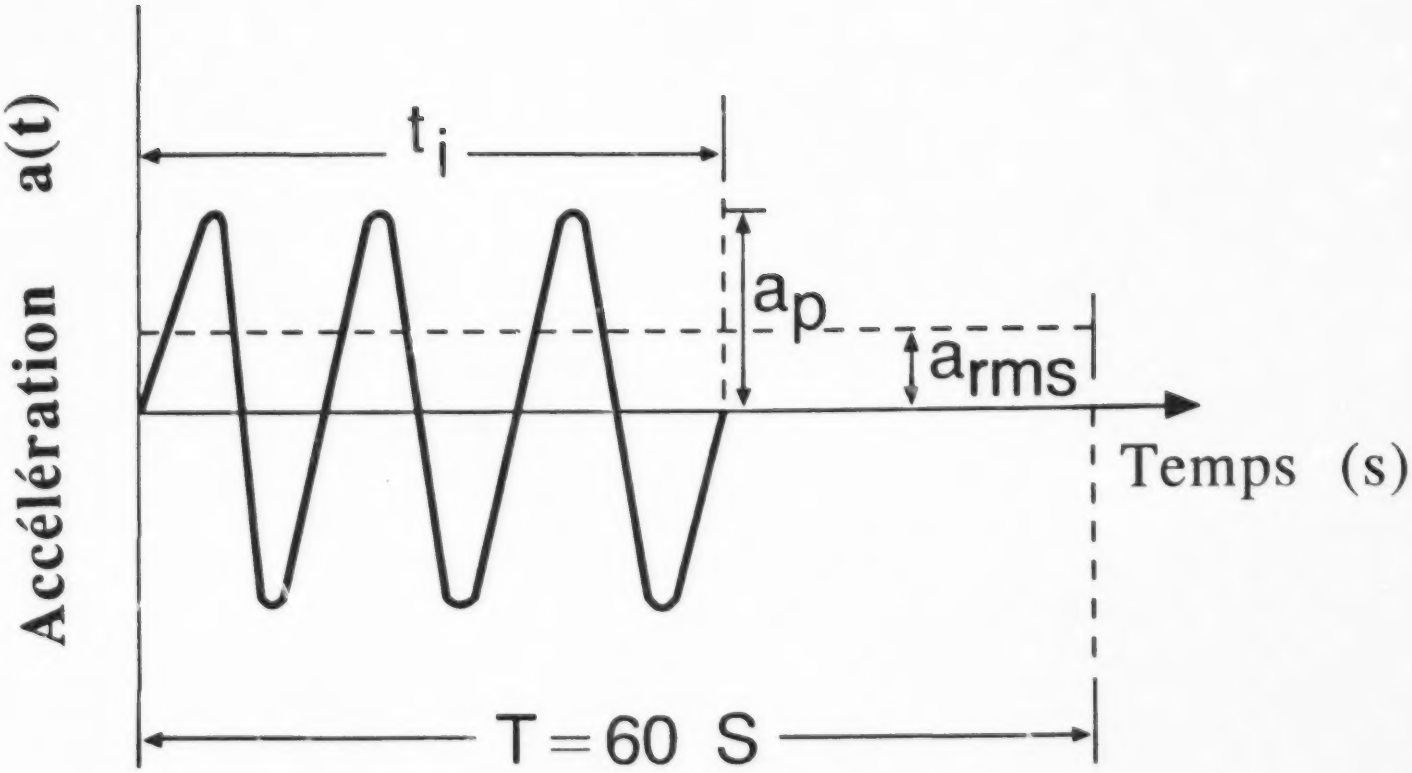


Figure 3: Salve de signaux sinusoïdaux dont l'accélération rms est maintenue constante mais dont le facteur de crête varie

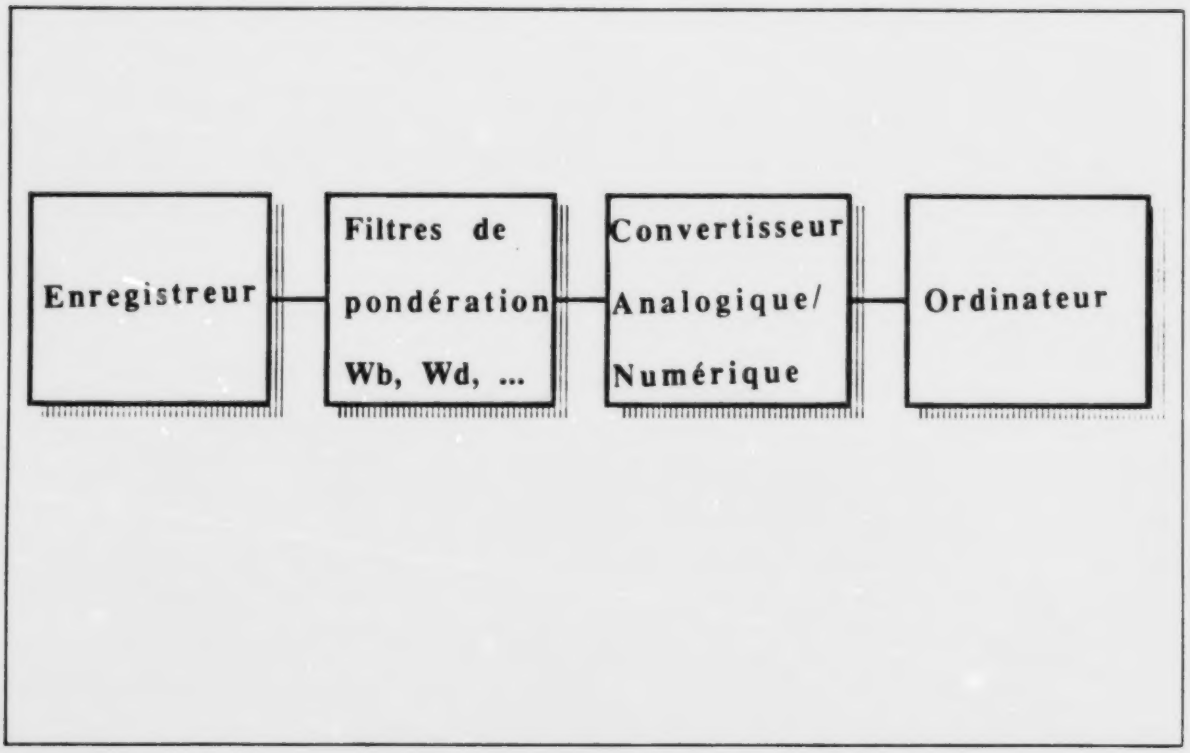


Figure 4: Montage expérimental pour l'évaluation des accélérations RMS et RMQ et du facteur de crête.

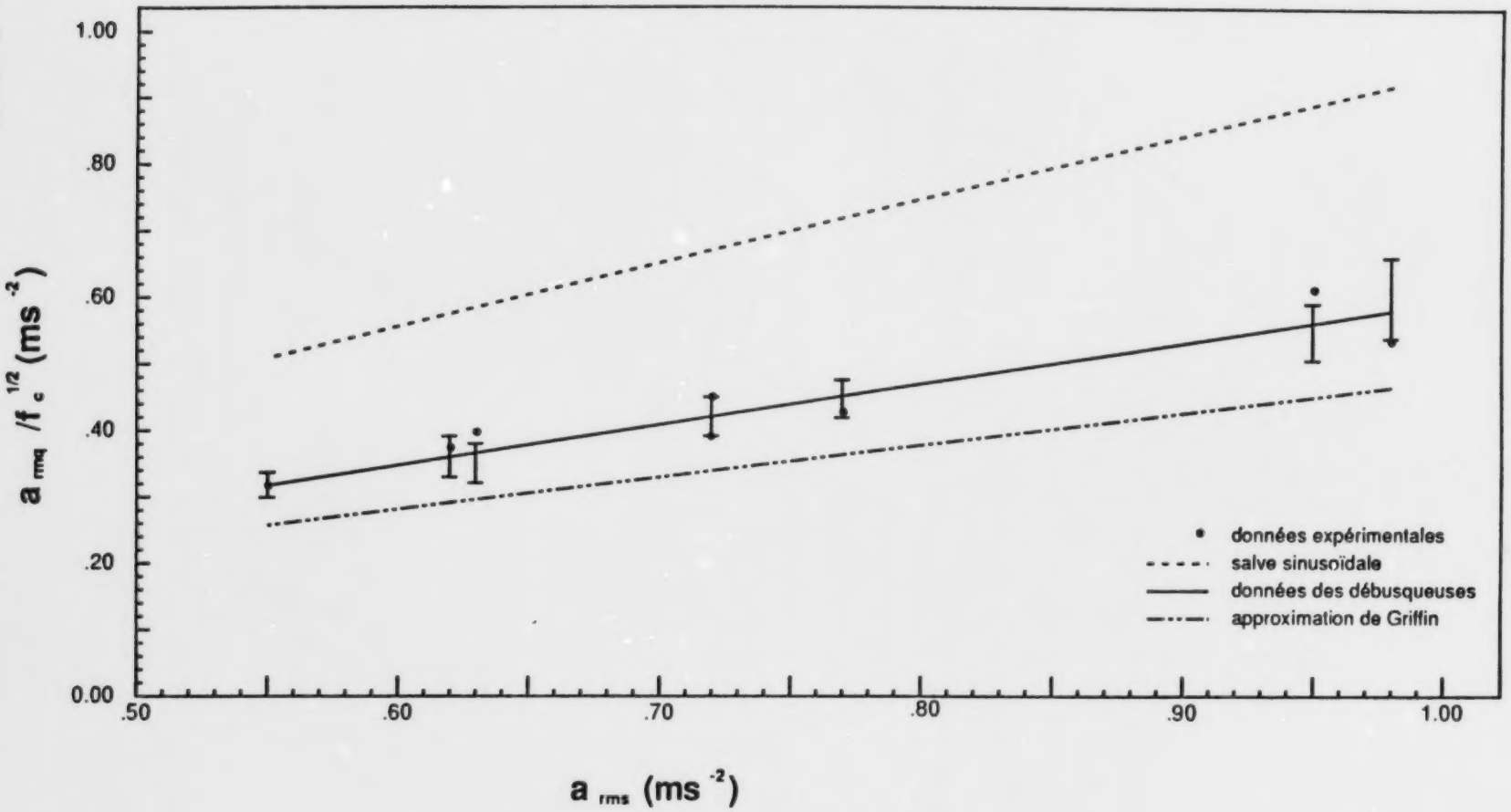


Figure 5: **Relation entre le rapport $a_{rmq}/f_c^{1/2}$ et a_{rms} pour des vibrations globales du corps enregistrées sur des débusqueuses en direction verticale**

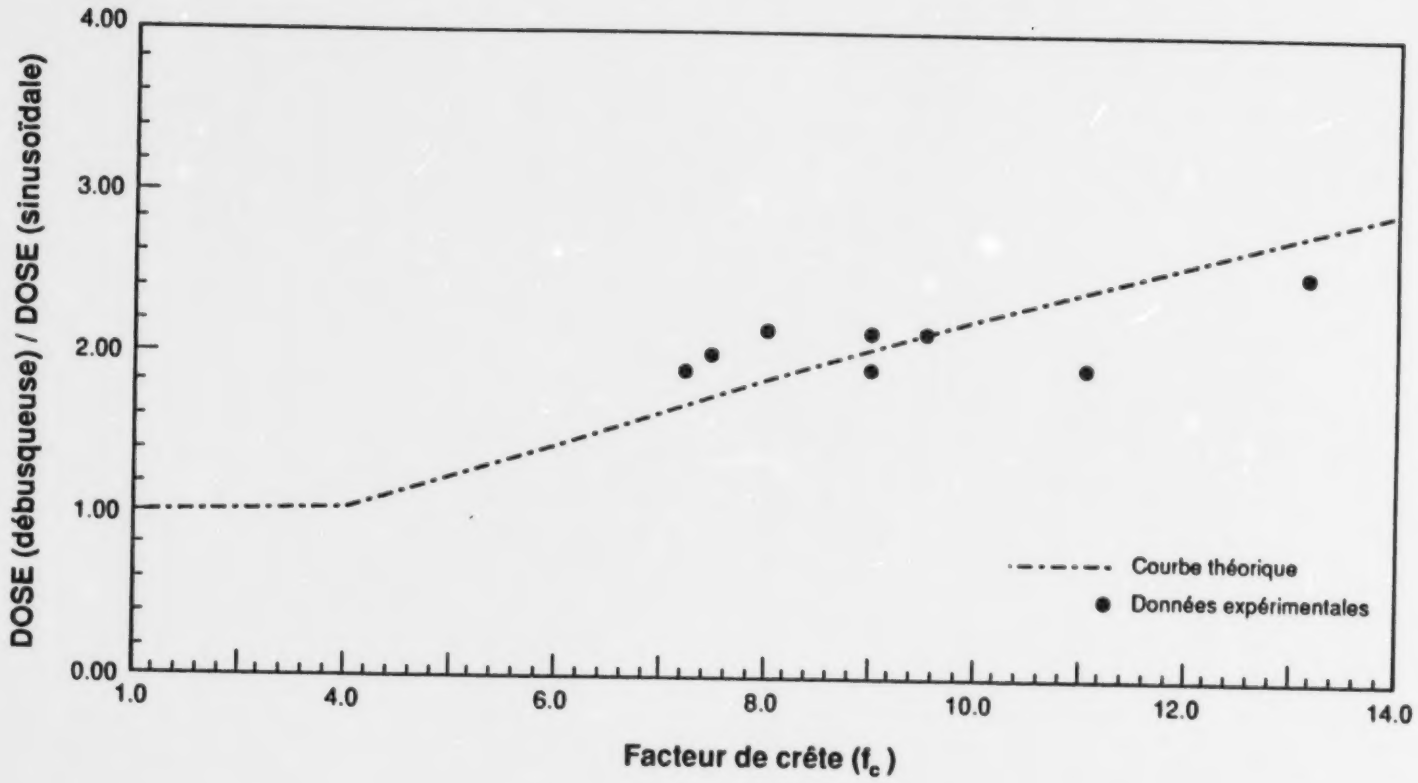


Figure 6: **Variation du rapport de la dose d'exposition relative au confort réduit sur la dose prédite pour un signal sinusoïdal en fonction du facteur de crête pour des vibrations verticales.**

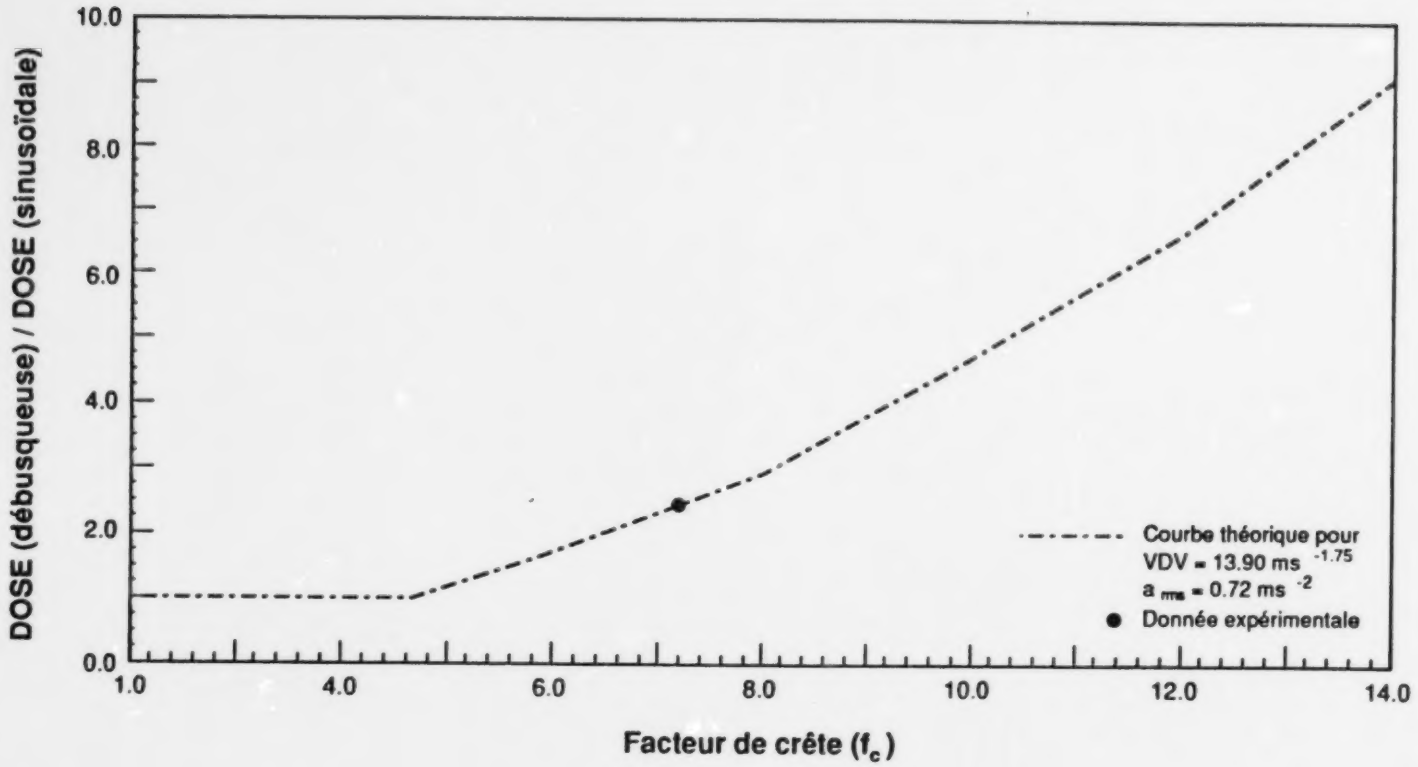


Figure 7: Variation du rapport de la dose d'exposition relative à la santé sur la dose pour un signal sinusoïdal en fonction du facteur de crête pour des vibrations verticales

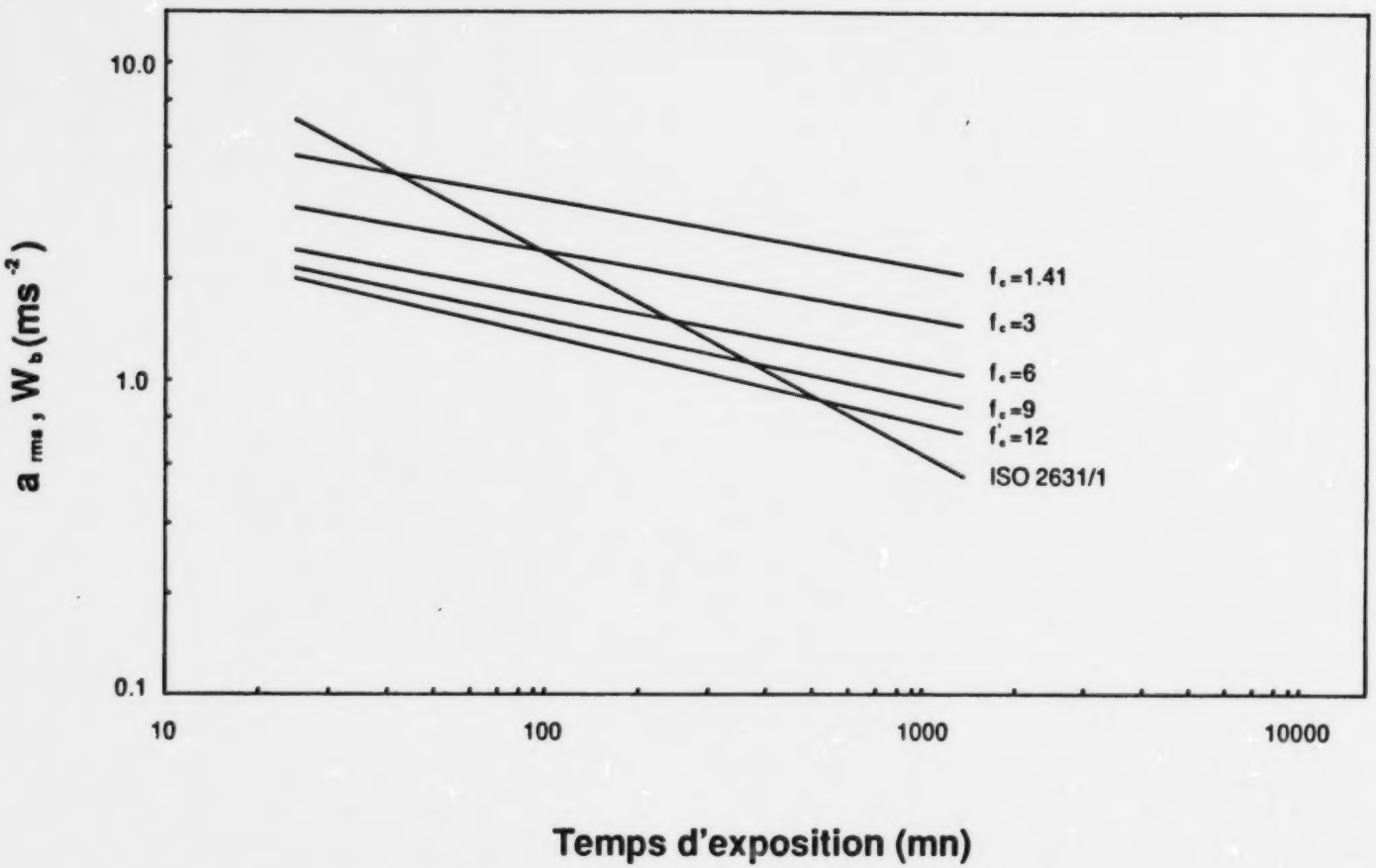


Figure 8: **Comparaison entre les deux relations qui dépendent du temps: ISO 2631/1 et -quadri-puissance- pour une valeur de la VDV constante fixée à 25 $ms^{-1.75}$.**